

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Agencia Estatal de Meteorología
Departamento de Física Aplicada

Mejoras técnicas para la detección de estructuras singulares mesoescalares en las imágenes de viento radial de los radares meteorológicos de AEMET

Autor:

Andrea Casans Gabasa

Directores:

Ismael San Ambrosio Beirán

Juan Pablo Martínez Jiménez



JUNIO 2019

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Fundamentos del Radar	4
2.1.1	Ecuación del Radar y Reflectividad	4
2.1.2	Modos de operación del Radar	5
2.1.3	Datos y Productos de los Radar de AEMET	7
2.2.	Aplicaciones Radar para la detección de estructuras convectivas.....	9
2.2.1	Módulo YRADAR 2D	9
2.2.2	Módulo YRADAR 3D	10
2.3	Detección de Estructuras Mesoescalares con Radar en Modo Doppler	12
3.	METODOLOGÍA.....	15
3.1	Planteamiento del problema	15
3.2	Datos de partida	16
3.3.	Desarrollo del método	17
3.3.1	Algoritmo.....	19
3.3.2	Nueva identificación de estructuras mesoescalares	20
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	20
4.1	26 de agosto de 2017 (15.40).....	20
4.2	23 de agosto de 2017 (18.30).....	24
5.	CONCLUSIONES	27
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	28
7.	AGRADECIMIENTOS.....	28
8.	ANEXO I: Fichero "matriz_final" 26/08/2017 15:40	
9.	ANEXO II: Gráfica "Ang_Norte-Vel_radial" 26/08/2017 15:40	
10.	ANEXO III: Gráfica "Ang_Norte-Vel_radial" 23/08/2017 18:30	
11.	ANEXO IV: Resultados 26/08/2017 16:50	
12.	ANEXO V: Resultados 23/08/2017 15:40	
13.	ANEXO VI: Código	

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros mapas meteorológicos se realizaron en el siglo XIX. No representaban estructuras específicas, pero eran capaces de mostrar algunos ciclones extratropicales. Estos mapas se denominan sinópticos, ya que hacen referencia a fenómenos meteorológicos que se producen en grandes escalas espaciales.

Gracias a los avances tecnológicos en teledetección y a la aparición de los radares meteorológicos es posible observar fenómenos que se producen en escalas más pequeñas (mesoescala, que va desde los 2 hasta los 2000 km); y que en ocasiones también pueden llevar asociadas consecuencias desastrosas en la superficie.

El estudio teórico de estas estructuras puede resultar más complicado; ya que en el planteamiento de las ecuaciones que rigen sus movimientos no pueden aplicarse algunas de las simplificaciones que sí llevan asociados los fenómenos de escala sinópticas (desde los 2000 hasta los 10000 km) o los de microescala (menores de 2 km).

Nuestro trabajo está centrado en el estudio de estructuras que tienen lugar en esta escala intermedia, es decir, en la mesoescala; y tiene como objetivo el estudio del comportamiento físico visto desde dos sistemas de referencia diferentes; incorporando una posible mejora técnica en el algoritmo de detección de mesoestructuras con el que trabaja AEMET. Para ello se parte de una hipótesis teórica en la que se considera que si se estudia cómo se comportan los píxeles inmersos en una estructura convectiva vistos desde “dentro” de esa estructura; es decir, desde el centroide de la célula 3D a la que pertenecen, en lugar de verlos desde “fuera” (desde el radar), puede potenciarse la descripción de este tipo de estructuras: mesociclones, mesoanticiclones, convergencias o divergencias y con ello mejorar su detección.

En el cuerpo del trabajo se explicará qué es una célula 3D y cómo queda caracterizada por su centroide; además de ver la definición y comportamiento de las cuatro estructuras mesoescalares citadas en el párrafo superior. Tras la explicación de estos fundamentos más teóricos, entre los que también aparece el funcionamiento de un radar y su forma de operar en modo Doppler, llegaremos al apartado de Metodología, en el que se verá cómo hemos abordado el problema y qué pasos hemos seguido para llevar a cabo una posible solución que cumpla nuestro objetivo.

En el apartado 4 se han mostrado los resultados de dos horas determinadas de dos días seleccionados por su actividad convectiva (corrientes ascendentes y descendentes de viento en la vertical). Se muestran las imágenes obtenidas con el radar comparando qué estructuras mesoescalares se detectan antes y después de aplicar la corrección.

Por último, se obtienen conclusiones vistos los resultados que se han obtenido y con ellas, queda abierta la posibilidad de futuras líneas de trabajo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos del Radar

La palabra RADAR es un acrónimo de la expresión inglesa “*RAdio Detection And Ranging*”. Son instrumentos que por medio de la emisión de ondas electromagnéticas son capaces de detectar y localizar blancos en el espacio (barcos, aviones u otros objetos). Por ello son clasificados como sistemas de **teledetección activos**. Las ondas emitidas por el radar se reflejan en los obstáculos y en su regreso son captadas por el receptor. Para calcular la distancia de estos objetos se mide el tiempo que tardan las ondas en volver al receptor desde que han sido emitidas.

Los parámetros de nuestro interés que los caracterizan son:

- Frecuencia de emisión
- Frecuencia de repetición de pulsos (PRF): número de pulsos emitidos por segundo. Este parámetro determina la distancia máxima a la que puede operar el radar.
- Duración del pulso
- Anchura del haz

En función de los valores que adopten estos parámetros, pueden diseñarse diferentes tipos de radares para distintas aplicaciones: aviación civil, meteorología, militares, etc.

2.1.1 Ecuación del Radar y Reflectividad

El radar registra la energía devuelta por los blancos en cada dirección. En el ámbito de la Meteorología los blancos corresponden a las gotas de agua que hay en el interior de un cierto volumen de atmósfera. La potencia media recibida por el radar viene determinada por la siguiente ecuación: [1].

$$\bar{P}_r = C L^2 |k^2| \frac{Z}{r^2} \quad (1)$$

- $C \rightarrow$ Constante del radar
- $L \rightarrow$ Factor que depende del medio (en nuestro caso la atmósfera) que recorre la señal hasta llegar al blanco.
- $Z \rightarrow$ **Reflectividad del blanco**. Aporta información de la eficiencia de los blancos contenidos en el volumen de atmósfera para interceptar y reflejar la energía emitida por el radar.
- $r \rightarrow$ Distancia del radar al blanco
- $k \rightarrow$ Permitividad dieléctrica del blanco

El parámetro más importante es la reflectividad (Z), ya que a partir de él podemos interpretar los tipos de blancos que se encuentran en la atmósfera. [2]

$$Z \text{ (mm}^6/\text{m}^3\text{)} = \int_0^\infty N(D) D^6 dD \quad (2)$$

Tal y como podemos observar en esta ecuación (2), la reflectividad depende del **diámetro de las partículas**, D y de la **función de distribución de los tamaños de las gotas**, $N(D)$. El factor D es de gran relevancia, ya que una pequeña variación en el tamaño de las partículas supone un gran cambio en la reflectividad, dado que se encuentra elevado a la sexta potencia.

Se puede establecer una relación entre reflectividad e intensidad de precipitación, R . Teóricamente se puede expresar la precipitación mediante una fórmula que representa el flujo de agua a través de una superficie horizontal: [2]

$$R \text{ (mm/hora)} = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} V(D)N(D)D^3 dD \quad (3)$$

Donde $V(D)$ es el término referido a la velocidad de caída de las gotas, que depende del tamaño de éstas. (Hemos respetado las unidades que se utilizan en el ámbito de Meteorología).

Operando con esta ecuación (3) y la ecuación (2) obtenemos una relación que concuerda aceptablemente con la relación empírica entre la reflectividad y la intensidad de precipitación; denominada **Relación de Marshall-Palmer**: [2]

$$Z = a R^b \quad (4)$$

Donde a y b son constantes que dependen del tipo de precipitación (lluvia, chubasco, llovizna, etc).

Es importante señalar que se pueden tener valores de Z iguales con distribuciones y tamaños de gotas muy diferentes. En la práctica se desconocen los tamaños y distribución de gotas de agua que hay en una nube precipitante, por lo que existe cierta ambigüedad al interpretar los valores de reflectividad. [2]

2.1.2 Modos de operación del Radar

En particular, los **radares meteorológicos**, trabajan con longitudes de onda del orden de unos pocos cm (orden de magnitud del tamaño de las partículas que queremos detectar, fundamentalmente gotas de precipitación) y pueden operar de dos modos diferentes, ambos con aplicaciones operativas en tiempo real: [1]

- **Modo convencional**: no tiene en cuenta la relación de fase entre dos pulsos consecutivos. Permite localizar blancos y obtener datos de reflectividad.
- **Modo Doppler**: se basa en el efecto Doppler y además de localizar los blancos, permite determinar su desplazamiento. Se obtienen datos de reflectividad y de velocidad radial. Es de esta forma como trabajan los radares de AEMET.

Radar en Modo Doppler

Los radares que trabajan en modo Doppler poseen ventajas adicionales frente al radar convencional ya que como se ha dicho, permiten observar el movimiento de los blancos. Si éstos se desplazan con una velocidad, v , la señal del eco recibida tiene una variación en frecuencia debida al *efecto Doppler* en ondas electromagnéticas, que depende de si el objeto se aleja o se acerca al radar.

Si llamamos f_E a la frecuencia de emisión, y f_r a la frecuencia de la señal reflejada por el objeto, podemos determinar: [3]

- $f_r > f_E \rightarrow$ el objeto se acerca al emisor (el radar), por lo que consideramos que llevan velocidades negativas.
- $f_r < f_E \rightarrow$ en este caso, el objeto se aleja del radar y por ello la velocidad se considera positiva.

Con la obtención de la diferencia entre la frecuencia de la señal reflejada y la recibida, que llamaremos *desplazamiento Doppler* (Δf_D), y aplicando aproximaciones del desarrollo de Taylor, se obtiene la velocidad del objeto: [3]

$$f_r = f_E \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} \quad (5)$$

$$\Delta f_D = f_r - f_E = f_E \sqrt{\frac{c-v}{c+v}} - f_E = f_E \left[\sqrt{\frac{c-v}{c+v}} - 1 \right] \approx \frac{-vf_E}{c} \quad (6)$$

$$v = \frac{c \Delta f_D}{f_E} \quad (7)$$

Los patrones de velocidad Doppler en una región extensa de precipitación estratiforme y en aire ópticamente transparente, representan los campos de viento. Para obtenerlos, consideraremos un sistema de coordenadas cartesianas en el que x e y corresponden a las distancias desde la posición del radar y consideraremos el eje vertical Z . La antena del radar rota sobre este eje con un ángulo de elevación constante (Φ) y obtenemos la componente radial de la velocidad del blanco (v_r) como función de la distancia a la región de dispersión (r_s) o a la altura h a la que éste se encuentra. [4]

El radar Doppler sólo detecta la componente de velocidad radial. Por ello, considerando la geometría de la figura 1, obtenemos: [4]

$$h = r_s \sin(\Phi) \quad (8)$$

$$H = R_s \sin(\Phi) \quad (9)$$

$$\frac{r_s}{R_s} = \frac{h}{H} \quad (10)$$

R_s y H , como puede verse en la figura 1, corresponden con el borde y la altura máxima de la región de detección del radar.

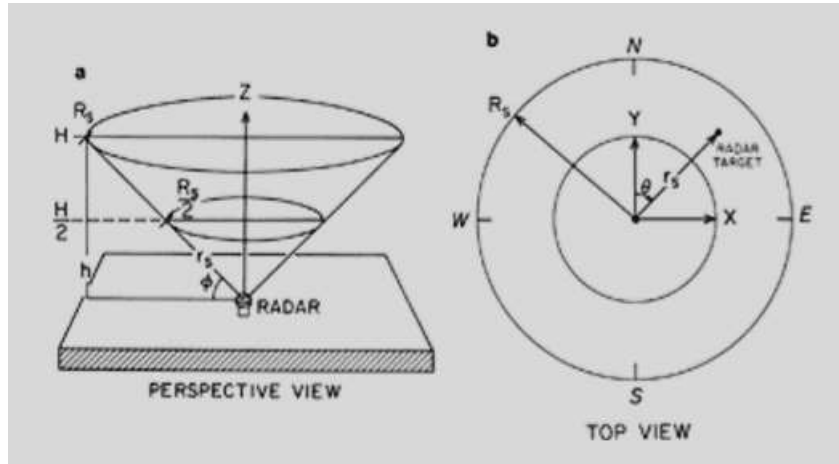


Figura 1: Configuración del radar Doppler. (a) Exploración del radar en torno al eje Z para un ángulo de elevación ϕ . (b) Visto desde arriba. R_s es la distancia medida desde la superficie hasta el borde de la región de detección del radar; h la altura desde el plano horizontal y H la altura máxima. La posición tridimensional del blanco (x, y, z) se calcula teniendo en cuenta el ángulo azimutal (θ), el de elevación (Φ) y la distancia r_s . [4]

De esta forma, la componente de viento Doppler (velocidad radial) dirigida al radar o alejándose de él se calcula: [4]

$$v_r = u \left(\frac{x}{r_s} \right) + v \left(\frac{y}{r_s} \right) + w \left(\frac{z}{r_s} \right) \quad (11)$$

Donde u es la componente de viento dirigida hacia el este, v la que se dirige al norte y w la vertical; que en ausencia de convección o movimientos verticales puede despreciarse.

2.1.3 Datos y Productos de los Radar de AEMET

La red de AEMET está formada por 15 radares, distribuidos por todo el territorio nacional y explorando diferentes volúmenes de la atmósfera. A partir de los datos suministrados se obtienen distintos **productos** que aportan la información necesaria y relevante para el posterior análisis y caracterización de las estructuras precipitantes que se estudian. Se obtienen productos en dos rangos de distancia diferentes: **rango largo** (se usa una PRF, es decir, una frecuencia de repetición de pulsos, y se alcanzan distancias de 240 km); y **rango corto** (se usan dos PRF, y únicamente se llega a 120 km). Para este trabajo se han utilizado datos con información obtenida del radar meteorológico en ambos rangos.

En rango corto se han usado datos del producto denominado *velocidad radial* en cada punto. Se trata de imágenes radar en las que los colores fríos corresponden con velocidades negativas, es decir, ecos que se acercan al radar; y los colores cálidos, velocidades positivas (ecos que se alejan del radar). Véase figura 2.

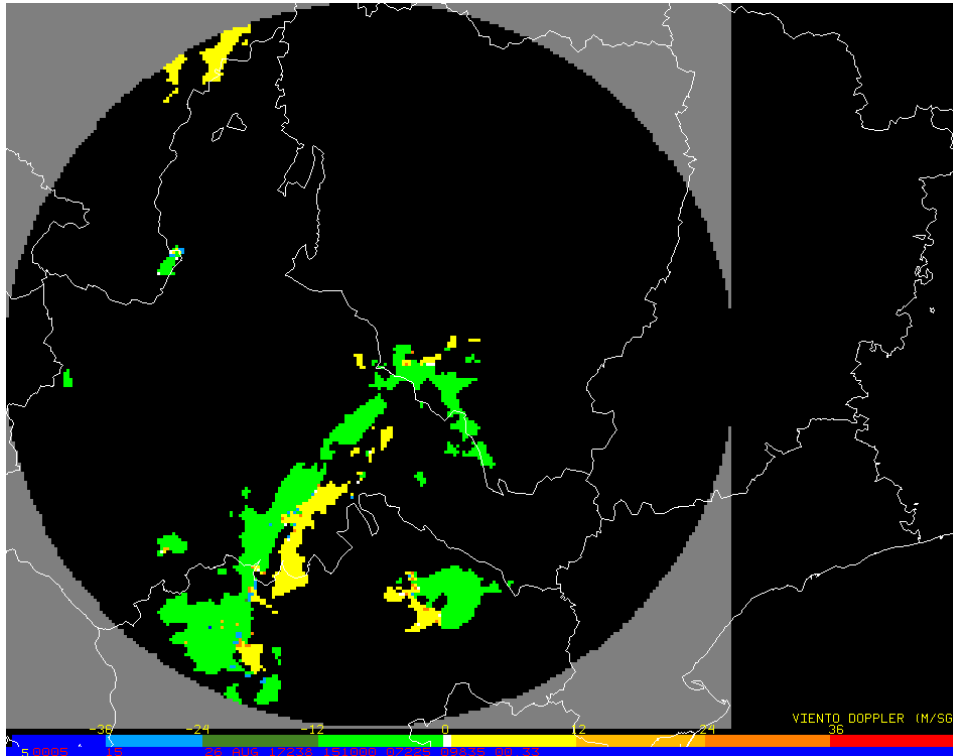


Figura 2: Imagen radar de Zaragoza del producto de velocidad radial. Fuente AEMET. La cobertura del radar son 120 km de radio. Los colores fríos corresponden a ecos que se acercan al radar; y los cálidos se alejan.

En rango largo se han usado los siguientes productos:

- *PPI*: datos de reflectividad correspondientes a la exploración en el primer plano de elevación ($0,5^\circ$).
- *CAPPIs*: corresponden con datos de reflectividad del radar en un Volumen Cartesiano. En las zonas más alejadas del radar, en los primeros CAPPIs no hay datos, ya que el ángulo de elevación más bajo es $0,5^\circ$ y el haz adquiere determinada curvatura a medida que se aleja del radar (figura 3). El Volumen Cartesiano de AEMET tiene 31 CAPPIs.

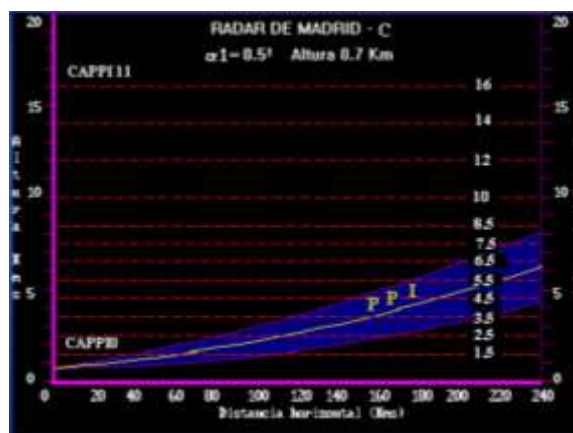


Figura 3: Curvatura del haz conforme se aleja del radar en la obtención de los CAPPIs. Fuente AEMET

2.2. Aplicaciones Radar para la detección de estructuras convectivas

Antes de hacer una identificación de patrones singulares en las imágenes de viento radial que nos permita caracterizar las estructuras mesoescalares, se realiza un análisis de datos de reflectividad para la detección de estructuras convectivas 2D y 3D. Para ello se utiliza una aplicación denominada YRADAR que consta de dos módulos (2D y 3D). [5]

A partir de los datos obtenidos por estas aplicaciones se trabajará en el algoritmo que calcule la velocidad de determinadas células 3D y que permita modificar la velocidad radial de los píxeles necesarios tal y como se explicará en profundidad más adelante.

2.2.1 Módulo YRADAR 2D

La identificación de las células 2D trata de separar los píxeles representativos de una zona caracterizada como potencialmente convectiva (píxeles denominados convectivos) de aquellos ubicados en zonas no convectivas. Para ello se hace un filtrado del PPI más bajo con las imágenes de satélite de manera que se desprecian aquellas estructuras de la imagen de reflectividad que no están soportadas por estructuras nubosas en la imagen de IR (infrarrojo) que posean temperaturas menores o iguales que -10°C ; ya que no se consideran ecos significativos. Posteriormente, mediante el procedimiento de Steiner-Yuter-Houze [6], se identifican los píxeles convectivos en las imágenes de reflectividad siguiendo estos 3 criterios: [7]

- Criterio de intensidad: inicialmente sólo se consideran convectivos aquellos píxeles que poseen reflectividades iguales o superiores a 45 dBz.
- Criterio de máximo local: serán convectivos aquellos píxeles que se encuentran con un valor de reflectividad entre 40 y 45 dBz y la diferencia entre la reflectividad del píxel y la de fondo (entorno que rodea al píxel determinado) sea mayor que un valor calculado empíricamente. En la figura 4 se puede apreciar esta curva.
- Criterio de cercanía: por último se considerarán convectivos aquellos píxeles con reflectividades bajas que estén cerca de alguno que previamente ya haya sido considerado. Para ello se establece otro criterio denominado radio medio de influencia. Este radio depende de la reflectividad de fondo media del punto convectivo considerado. En la figura 5 podemos ver este criterio de radio de influencia dividido en tres umbrales: pequeño, medio (utilizado por AEMET) y grande.

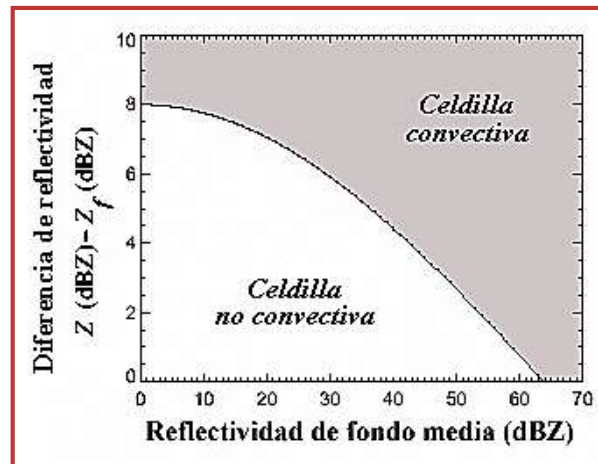


Figura 4: Identificación de celdas convectivas y no convectivas. [7]

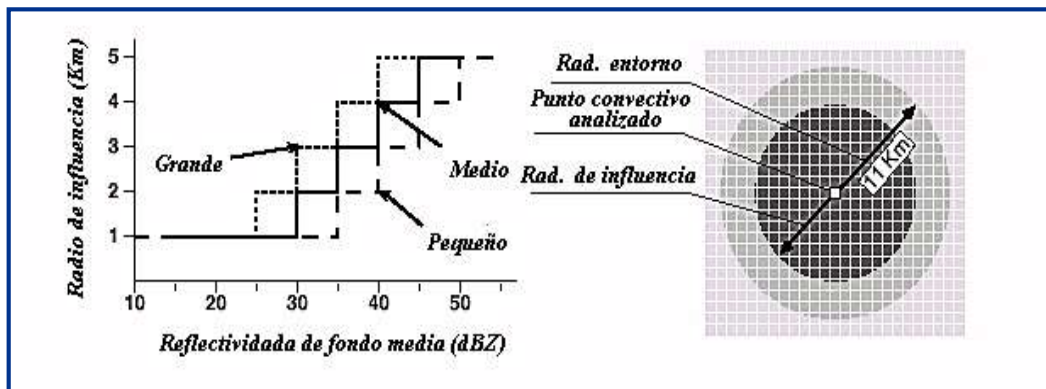


Figura 5: Umbrales radios de influencia de células convectivas. [7]

Una vez clasificados los píxeles como convectivos o no convectivos, se agrupan considerando únicamente aquellas estructuras que poseen un tamaño mínimo de 12 km². Pasan a formar parte de una célula cuando están conectados por uno de los cuatro lados. Estas células se caracterizan por un punto principal denominado **centroide**, al cual se le asignan una serie de propiedades: reflectividad máxima, reflectividad media, etc. Éste se obtiene como su “centro de masas”; es decir, se promedia la posición de cada píxel (latitud y longitud) ponderando con los valores de reflectividad que posean. [7]

2.2.2 Módulo YRADAR 3D

Ya que la convección se caracteriza por poseer desarrollos verticales importantes en el campo de reflectividades, se ha adaptado un procedimiento de identificación tridimensional de estructuras convectivas basado en el algoritmo SCIT (Storm Cell Identification and Tracking) del NSSL (National Severe Storm Laboratory) de EE.UU [9]. Las células convectivas 3D son estructuras compactas y con valores de reflectividad entre 30 dBZ y 90 dBZ, a las que también se les asigna un centroide que en este caso, tiene en cuenta el espesor vertical. Previamente se identifica en cada CAPPI los núcleos de reflectividad más intensa; y a continuación, comenzando

por el CAPPI más bajo, se busca, en la vertical, el objeto con mayor contenido acuoso al que se le asociará el objeto más cercano del siguiente CAPPI (comparando las distancias entre centroides). En el caso de que existan varios objetos en el CAPPI superior, asignaremos, de nuevo, el que tenga mayor contenido acuoso. El proceso continúa hasta el último CAPPI y de esta forma, cada célula 3D estará compuesta por varios objetos de diferentes niveles. [8]

Una vez identificadas todas las células, se hace un seguimiento o “tracking” que permite identificar en una secuencia de imágenes las posiciones anteriores del centroide asociado a una misma célula 3D, hasta una hora antes, en intervalos de 10 minutos. [8]

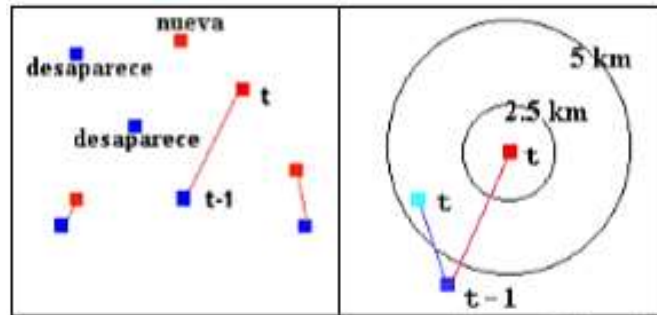


Figura 6: Procedimiento de tracking [8]

En el panel de la izquierda de la figura 6 se muestran las asignaciones realizadas. En rojo se representan las células de la imagen actual y en azul oscuro las de la imagen anterior. Podemos ver que se producen 3 asignaciones, dos células se disipan y una célula es nueva.

El método de tracking tiene dos pasos principales: [8]

- Inicialmente se crea una imagen first-guess o “desplazamiento teórico” a partir del desplazamiento de los centroides de la imagen anterior hasta la actual. El vector velocidad para producir este desplazamiento se calcula promediando entre la velocidad media de traslación de las células que se encuentran dentro de un radio de 50 km alrededor de la célula de interés y el viento medio del entorno (promediado entre 925, 850, 700 y 500 hPa).
- El segundo paso se basa en la cercanía entre centroides de las células de la imagen actual y de los centroides first-guess en diferentes radios de búsqueda (2,5, 5, 7,5, 10 y 12,5 km). Si existen dos centroides first-guess a la misma distancia, se selecciona el que posea mayor contenido acuoso.

Por último, se hace una extrapolación que predice la posición del centroide de cada célula 3D en intervalos de 10 minutos hasta una hora. El cálculo se realiza por medio del ajuste de una recta por mínimos cuadrados a las 6 posiciones anteriores de la célula. En la figura 7 podemos ver una imagen en la que se aprecia el procedimiento de tracking y extrapolación. [8]

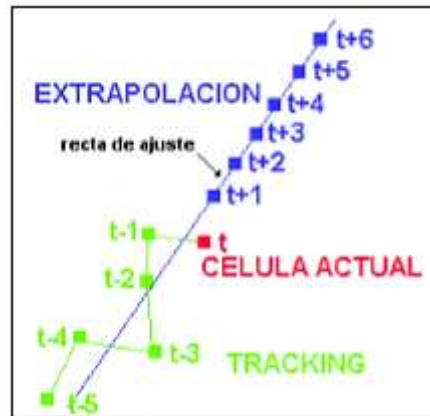


Figura 7: Procedimiento de tracking y extrapolación [8]

2.3 Detección de Estructuras Mesoescalares con Radar en Modo Doppler

Algunas de las estructuras meteorológicas más representativas de la mesoescala son los distintos tipos de tormenta que llevan asociadas corrientes de convección; es decir, fenómenos producidos por la presencia de flujos de corrientes ascendentes y descendentes con velocidades superiores a 10 m/s que pueden llevar asociados granizo, precipitaciones intensas, fuertes vientos, tornados y/o actividad eléctrica. [10]

Para caracterizar estos fenómenos se utilizan los productos generados por los radares meteorológicos. A partir de estos datos se pueden clasificar dichos fenómenos convectivos en 4 tipos de tormenta (ordenados de menor a mayor duración, tamaño y severidad): [10]

- Células simples
- Multicélulas
- Supercélulas
- Sistemas convectivos de mesoescala

En el interior de algunas de estas estructuras de mesoescala se pueden formar diferentes patrones mesoescalares de circulación específicos que en ocasiones, pueden ser detectados por el radar. Se identifican por medio de un algoritmo que utiliza los datos de radares operativos en modo Doppler.

Es cierto que esta identificación todavía no está operativa, ya que no es del todo precisa. Pueden encontrarse algunas limitaciones genéricas (como el **efecto aliasing**¹) o propias de los radares de AEMET (como la resolución espacial en píxeles de 1 km x 1 km; o datos de velocidad radial únicamente del PPI más bajo y no de todo el volumen polar o cartesiano). Es por ello que se ha elaborado una hipótesis que cambia la forma de estudiar y analizar los fenómenos convectivos teóricamente.

El procedimiento de detección de AEMET consta de las siguientes etapas: [10]

1. *Preproceso*: se considera una imagen radar de velocidad radial (como la que hemos visto en la figura 2). Se trata de quitar el ruido inherente a la imagen, y para ello se

¹ Efecto Aliasing: velocidades por encima de los 48 m/s no se asegura que se detecten correctamente.

eliminan los píxeles que poseen datos de velocidad aislados y se suaviza la imagen rellenando huecos con el valor medio de las velocidades de los píxeles que los rodean.

2. *Análisis 1D*: identificamos por filas y por columnas (de manera independiente) los segmentos² positivos (poseen un valor máximo de velocidad radial) o negativos (incluyen un valor mínimo). Únicamente se consideran segmentos del tamaño entre 2 y 10 km con una velocidad absoluta media superior a 12 m/s. Podemos apreciar una imagen de estos segmentos en la figura 8.
3. *Análisis 2D*: combinación de los segmentos individuales de filas y columnas en estructuras 2D. Para incluirse en estas estructuras es necesaria la existencia de al menos otro segmento en una fila o columna adyacente.
4. *Resultado final*: identificación de los valores máximos y mínimos de velocidad de estructuras 2D que pueden dar lugar a una estructura ciclónica si se cumple que una pareja máximo-mínimo no puede estar separada más de 20 km y la diferencia de velocidades debe ser de más de 40 m/s. Además, los valores de reflectividad deben ser superiores a 20 dBz.

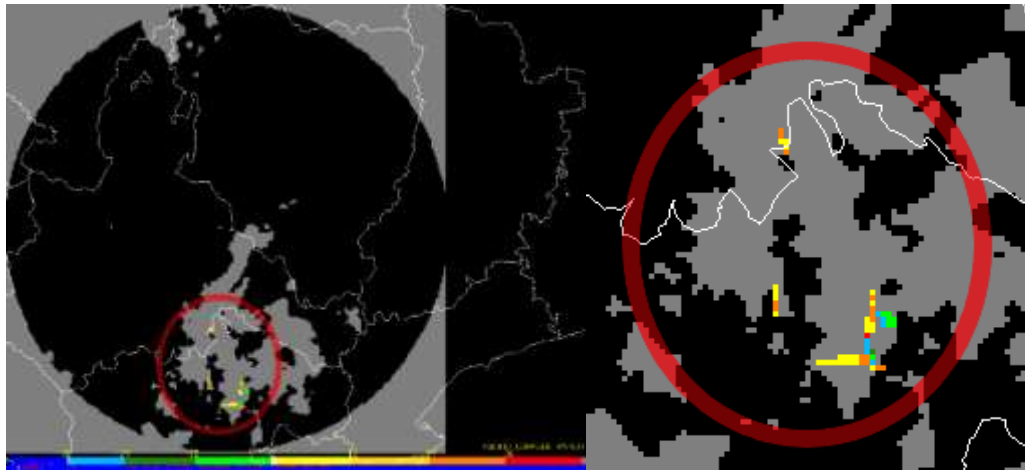


Figura 8: Imagen análisis de segmentos. Colores cálidos corresponden con velocidades positivas que se alejan del radar y colores fríos, negativas que se acercan al radar.

Una vez llevado a cabo este procedimiento de detección de estructuras mesoescalares, se pasa a la clasificación de éstas como **convergencias**, **divergencias**, **mesociclones** o **mesoanticiclones** en función de la posición de los máximos y los mínimos de velocidad.

La estructura más típica es la de un **mesociclón** que posee rotación antihoraria; mientras que en un **mesoanticiclón** se produce una rotación horaria. La ubicación de los máximos y los mínimos de velocidad para dar lugar a una estructura de un tipo o de otro se puede ver en las siguientes figuras (9) y (10): [Autores: Richard J. Doviak y Dusan S. ZRNIC]

² Segmento: conjunto de datos de velocidad radial Doppler de una misma fila o columna. El segmento comienza en el dato de velocidad radial que pasa de valores crecientes a decrecientes y finaliza cuando se produce la misma variación; o viceversa.

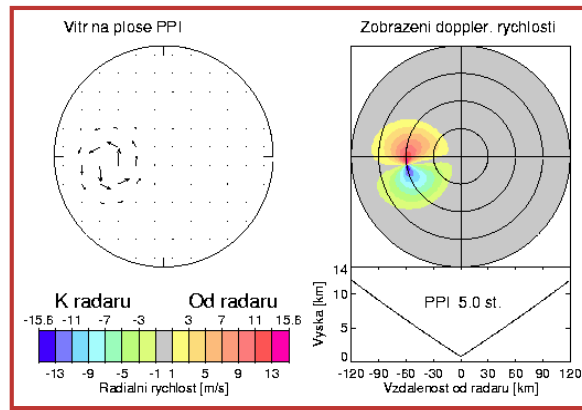


Figura 9: Patrón de velocidad Doppler (izquierda) de un mesociclón con rotación antihoraria (derecha). La longitud de las flechas es proporcional a la velocidad del viento y el radar se encuentra en el centro. Tal y como se ha mencionado anteriormente, los colores fríos (velocidades negativas) corresponden a ecos que se acercan al radar y los cálidos (positivas) se alejan.

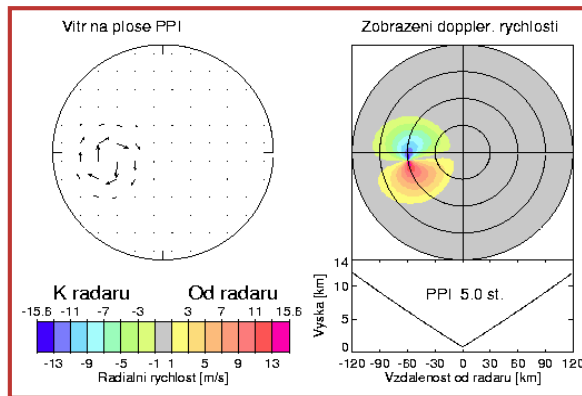


Figura 10: Patrón de velocidad Doppler (izquierda) de un mesoanticiclón con rotación horaria (derecha).

Los puntos de velocidad máxima y velocidad mínima se encuentran aproximadamente a la misma distancia del radar en ambas estructuras, y la diferencia se encuentra en la posición angular respecto al norte. Es decir, en el mesociclón (figura 9) el ángulo respecto al norte del máximo es mayor que en el mínimo. Sin embargo, en el mesoanticiclón (figura 10) ocurre a la inversa.

Además de mesociclones o mesoanticiclones, también se pueden encontrar las que hemos denominado anteriormente como convergencias o divergencias. En este caso, tal y como veremos en las figuras 11 y 12, el ángulo respecto al norte del máximo y del mínimo es prácticamente el mismo; y la diferencia se encuentra en la distancia al radar. En una convergencia el máximo se encuentra a menor distancia del radar que el mínimo, y en las divergencias ocurre a la inversa.

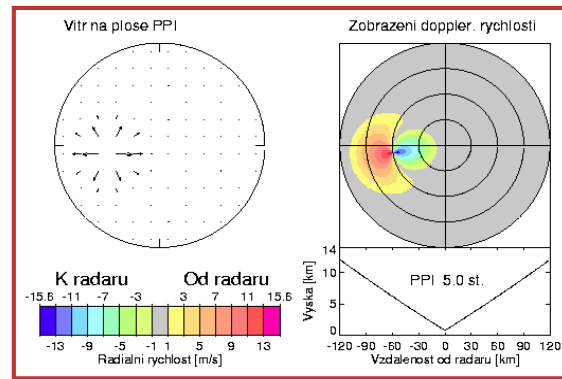


Figura 11: Patrón de velocidad Doppler (izquierda) de una divergencia (derecha). Autores: Richard J. Doviak y Dusan S. ZRNIC

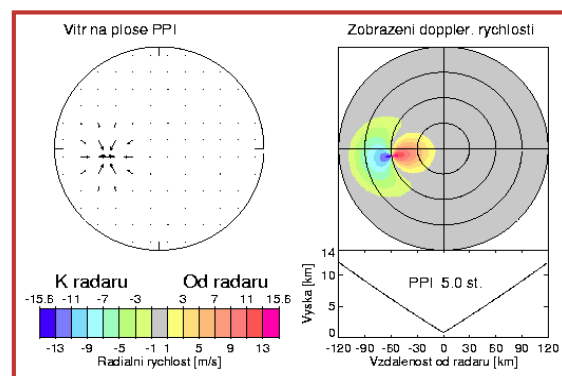


Figura 12: Patrón de velocidad Doppler (izquierda) de una convergencia (derecha). Autores: Richard J. Doviak y Dusan S. ZRNIC

3. METODOLOGÍA

3.1 Planteamiento del problema

Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, al método de identificación de estas estructuras mesoescalares todavía le queda camino por recorrer para considerar que posee plena fiabilidad y pase a formar parte de las aplicaciones operativas de detección de AEMET. Ya se ha mencionado que el método posee limitaciones en las que se está trabajando para mejorar esta detección e identificación; y se siguen estudiando diferentes técnicas que consigan dar con la clave.

Este ha sido el motivo que ha llevado a desarrollar un método que tenga como finalidad la posible mejora en la detección e identificación de este tipo de estructuras. Para ello, se ha analizado la situación actual y se ha elaborado una hipótesis que suponga una posible solución al problema.

Esta hipótesis está basada en un cambio de observador. La identificación que se lleva a cabo actualmente considera la velocidad radial de los píxeles en un momento determinado. Ese valor de velocidad es un valor global; es decir, es el valor de la velocidad de cada píxel respecto del

radar que ve lo que ocurre en tiempo real (como si se tratase de un “observador externo” que describe cómo se comportan las estructuras convectivas desde fuera). Esto es, que la velocidad obtenida para cada píxel sería la suma de la velocidad de las corrientes internas de las estructuras y de la velocidad con la que se desplazan las estructuras convectivas.

Nuestra idea se basa en realizar la identificación con datos de velocidad radial de los píxeles con respecto al centroide de la célula a la que pertenecen es decir, la velocidad local de los píxeles dentro de las células. Por un lado se estima la velocidad con la que se desplaza la estructura convectiva globalmente y por otro se tiene en cuenta la velocidad de los píxeles en el interior describiendo de forma más precisa su comportamiento dinámico.

La mejora de esta identificación supondría un cambio en la caracterización física del comportamiento teórico de las estructuras mesoescalares, ya que pasaríamos de estudiarlas globalmente (vistas desde el radar), a ver cómo es la dinámica interna de las estructuras en cada uno de los píxeles embebidos en ella, ubicándonos en el centroide de la célula 3D al que pertenece cada píxel.

3.2 Datos de partida

Los datos de los que partimos provienen de los productos radar que hemos explicado anteriormente. El producto en rango corto nos da la información de la velocidad radial que lleva cada píxel que se encuentra dentro de su cobertura; y de los productos en rango largo, obtenemos la información pertinente a la identificación de estructuras 2D y 3D. Todos estos datos quedan recogidos en 5 tipos de ficheros:

- **Fichero de velocidades radiales:** fichero con datos de velocidad radial original dentro de la cobertura del radar en rango corto (radio de 120 km). Tal y como se ha explicado, estas velocidades corresponden con datos globales de la velocidad absoluta respecto al radar.
- **Ficheros de latitud y longitud:** estos ficheros almacenan la latitud y la longitud de los píxeles que se encuentran en la cobertura del radar en rango corto.
- **Fichero IF:** este tipo de fichero contiene la información de las células convectivas 2D que han sido identificadas por la aplicación YRADAR 2D. Puede verse el número de células 2D que se han detectado a una hora determinada, el número de píxeles por los que está formada cada una de ellas y la posición (latitud y longitud) de éstos.
- **Fichero ID:** en él encontramos la información relativa a las células 3D, en este caso obtenida por YRADAR 3D. Puede verse el número de células 3D que son detectadas en esa hora concreta y la latitud y longitud de su centroide.
- **Fichero EX:** en él podemos ver la evolución de esas células 3D; es decir, la posición prevista (latitud y longitud) de los centroides de 10 minutos en 10 minutos hasta una hora después. Estas posiciones se han calculado usando el método de extrapolación y tracking de la aplicación YRADAR 3D (explicado en el apartado 2.2.2).

El proceso de obtención de estos ficheros es laborioso. Para ello se ha requerido una formación previa en informática que nos ayudara a familiarizarnos con el uso del entorno McIDAS (Man computer Interactive Data Access System), aplicación desarrollada por la Universidad de Wisconsin-Madison para el estudio meteorológico; y que permite el acceso, almacenamiento, representación y tratamiento de diferentes tipos de datos; y que tras su procesamiento permite

obtener los ficheros descritos y las imágenes que veremos en el apartado de análisis de resultados.

3.3. Desarrollo del método

Una vez conocidos los datos con los que se va a trabajar, explicaremos el método que hemos llevado a cabo para probar nuestra hipótesis y verificar si la detección puede mejorarse. Para ello, se han elegido dos días en los que se tiene constancia de se han producido fenómenos convectivos. Estos días corresponden al 23 de agosto de 2017 y 26 de agosto de 2017. Además, se han seleccionado las horas en las que la precipitación ha sido mayor (desde las 15:00 hasta las 19:00 para el primer día, y desde las 15:00 hasta las 17:00 para el segundo; en intervalos de 10 minutos). Cabe mencionar que la selección adecuada de los días a estudiar no es sencilla; ya que la información real se obtiene a posteriori. Inicialmente, solo se conocen las consecuencias en superficie y a partir de ello comienza el proceso de recopilación y análisis de datos en el entorno McIDAS con el que obtenemos los ficheros de partida que nos permiten comenzar a trabajar en la detección e identificación de estructuras mesoescalares.

Los pasos a seguir han sido los mismos para ambos casos en cada uno de estos intervalos de tiempo. Se comienza con una asignación de los píxeles convectivos integrados en células 2D a células 3D. El criterio de esta asignación se basa, únicamente, en cercanía. Es decir, hemos asignado píxeles convectivos de células 2D a células 3D cuando se encontraban lo suficientemente cerca de un centroide 3D. Para ello se han comparado las latitudes y longitudes de cada píxel convectivo y de cada centroide 3D y se han establecido unos umbrales para delimitar esa distancia; intentado maximizar el número de píxeles que se asignan a alguna célula 3D y cumpliendo la condición de que solamente sean asignados a una única célula.

Una vez hecha esa asignación, a cada uno de estos píxeles que ahora corresponden a una célula 3D determinada, les hemos asociado la velocidad de esta célula, despreciando aquellos que quedan fuera de la cobertura radar en rango corto. No debemos olvidar que los datos de células 2D y 3D provienen de productos de análisis del radar cuya exploración tiene un radio de 240 km; mientras que los datos de velocidad únicamente alcanzan distancias de 120 km.

Como resultado de este primer estudio nos quedaría una matriz con 5 entradas para cada uno de los intervalos de tiempo: latitud y longitud de los píxeles asignados a células 3D, el número de célula 2D a la que pertenecen y 3D a la que han sido asignados y la velocidad radial original que poseen (vista desde la posición del radar).

A continuación debemos calcular la componente de velocidad radial de cada célula 3D en la que están incluidos los píxeles; ya que posteriormente será ese valor el que restaremos a la velocidad obtenida por el radar para hacer el cambio de referencia, de forma que el resultado corresponda a la velocidad del píxel como si se viera desde el centroide de cada célula 3D y no le afectara el movimiento de la estructura.

Para este cálculo necesitamos conocer la posición (latitud y longitud) del centroide en un momento determinado (de nuevo, información que obtenemos del *fichero ID*) y su posición 10 minutos después (dato obtenido del *fichero EX*)³. Con estos datos, calculamos la distancia que

³ Podríamos plantearnos haber usado la latitud y longitud que poseemos de los 10 minutos posteriores, también de los *ficheros ID*. Sin embargo, nuestro objetivo es hacer un estudio que aporte información en

ha recorrido el centroide de la célula 3D y con el tiempo invertido en ese desplazamiento obtenemos la velocidad total que habrá que descomponer para quedarnos con la componente radial. Este cálculo se realiza pasando de coordenadas esféricas (latitud y longitud) a coordenadas cartesianas y calculando la distancia, sobre la superficie esférica, primero entre el radar y la posición inicial del centroide de la célula (vector posición inicial) y después entre la posición inicial y final (vector desplazamiento) de ese mismo centroide.

Finalmente se calcula el ángulo respecto al norte del vector posición inicial y del vector desplazamiento, y con la diferencia de estos dos ángulos, es inmediato obtener la componente radial de velocidad; tal y como podemos ver en la figura 13. En ella, P corresponde con el vector posición inicial, θ es el ángulo respecto al norte de este vector, ϕ es el ángulo respecto al norte del vector desplazamiento, V , del cual obtenemos la velocidad total; y v_r la componente radial de la velocidad obtenida con el coseno del ángulo $(\phi - \theta)$.

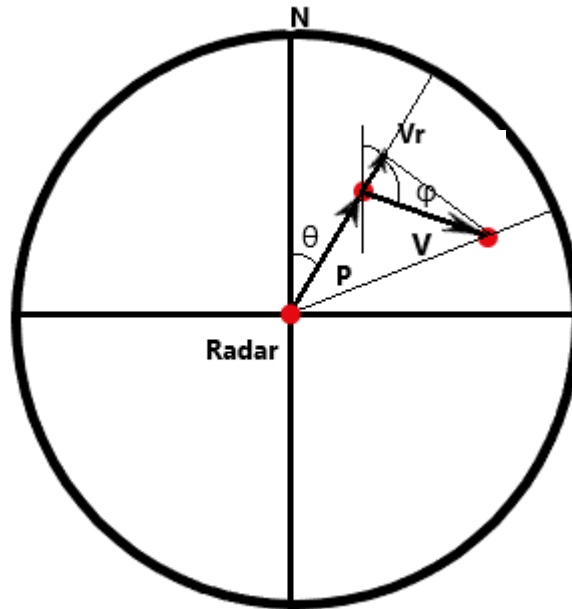


Figura 13: Representación obtención de la componente radial de velocidad.

Posteriormente restamos esta componente de velocidad radial de la célula a la velocidad original que tiene cada píxel, obteniendo el resultado buscado; es decir, la velocidad del píxel como si estuviéramos observando desde dentro de la célula y éste no se viera afectado por el desplazamiento de la estructura. En la ecuación 12 podemos ver la expresión de cálculo de esta velocidad:

$$V_{rfpix} = V_{rorig} - V_{r3D} \quad (12)$$

tiempo real y en ese caso, todavía no se tendría la información de la ubicación de la célula 10 minutos después ; únicamente se tiene la predicción teórica de su posición realizada por el método de *tracking* y extrapolación explicada en el apartado 2.2.2.

Donde V_{rfpix} es la componente radial de velocidad final de los píxeles, V_{rorig} es la velocidad radial inicial de los píxeles (dato de los ficheros de velocidad) y V_{r3D} corresponde a la componente radial de la velocidad calculada para cada uno de los centroides 3D.

A la matriz mencionada anteriormente le añadiremos algunas entradas en las que se mostrarán las velocidades radiales tanto de las células 3D, como la velocidad modificada de los píxeles. También se han añadido las posiciones angulares respecto al norte en sentido horario y las distancias de cada uno de los píxeles al radar.

Se crea así una matriz para cada intervalo de 10 minutos que hemos estudiado y se escriben en un fichero denominado *matriz_final* que puede verse en el anexo 1.

A partir de esta *matriz_final* se modifica la imagen original de velocidad radial para proceder a una nueva identificación de estructuras mesoescalares. Tal y como se ha explicado en el apartado 2.2, se compara la posición angular y radial de los píxeles comprobando la existencia de máximos y mínimos de velocidad lo suficientemente cerca de forma que puedan generar alguna de las estructuras citadas (ciclones, anticiclones, convergencias o divergencias).

Para mostrar los resultados, además de los ficheros con las matrices descritas, se realizarán algunas representaciones gráficas que permitan apreciar mejor cómo se modifica la velocidad de los píxeles al eliminar la componente de velocidad a la que se desplazan las células en función de la posición angular respecto al norte que ocupan. También podrá verse y comparar qué ha ocurrido al generar las nuevas imágenes radar y qué ha ocurrido con la identificación de las estructuras.

3.3.1 Algoritmo

El método de corrección de velocidades que se ha explicado, se recoge en un algoritmo programado en lenguaje C, que ejecuta paso a paso todo lo explicado.

Lo hemos dividido en 3 funciones a las que llamamos desde el programa principal:

- La primera función la hemos llamado *vel_brillo* y su labor es leer el fichero en el que están almacenados los datos de velocidad radial original de cada uno de los píxeles que están dentro del alcance de la cobertura del radar (120 km de radio).
- A la segunda función la hemos llamado *lee_pix_cel3d*. En este caso leemos la latitud y longitud de todos los píxeles que se van a analizar, los *ficheros ID* y los *ficheros EX*. Con toda la información que contiene este tipo de ficheros leída y almacenada, calcula la posición respecto al radar de cada célula 3D en el instante de tiempo que estamos estudiando y 10 minutos después.
- A la última función la hemos llamado *lee_cel_2D*. Ésta se encarga de leer los ficheros IF y almacenar la información de todos los píxeles pertenecientes a células 2D (latitud, longitud y número de célula 2D en la que se encuentran). También calcula la posición de cada uno de los píxeles dando el ángulo respecto al norte y la distancia al radar.

En el programa principal, como hemos dicho, se llama a las 3 funciones y se realiza la asignación de píxeles convectivos de células 2D a células 3D, estableciendo los diferentes umbrales de distancia que cumplan los requisitos descritos anteriormente (asignación unívoca a una célula 3D pero del mayor número posible de píxeles).

A continuación se crea una matriz llamada *radar* que guarda la latitud, longitud y velocidad de cada píxel que se encuentra dentro de los 120 km de radio de exploración; y se hace una comparativa con latitudes y longitudes de píxeles asignados a 3D descartando aquellos que no se encuentran dentro de este alcance⁴.

Establecidas todas las comparativas y asignaciones descritas, se calcula la velocidad de los píxeles aislados en m/s y escribimos todo en el fichero *matriz_final*.

3.3.2 Nueva identificación de estructuras mesoescalares

Con las velocidades modificadas, queda ver la nueva detección e identificación de estructuras mesoescalares. Para ello, se han introducido nuestros ficheros en un algoritmo de AEMET denominado YMESOCICLONES que identifica y clasifica las estructuras; además de generar las imágenes radar de velocidades radiales y segmentos que muestren qué ocurre con nuestras nuevas situaciones⁵ para posteriormente poder comparar y obtener conclusiones.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez explicado cual es el problema y el método que se ha seguido para llevar a cabo una solución, se mostrarán los resultados experimentales que se han obtenido.

Tal y como se ha indicado anteriormente, se ha realizado el estudio para dos días en los que se tiene constancia, por los sucesos vistos en superficie, que poseen alta convectividad. Mostraremos los resultados del 26 de agosto de 2017 a las 15:40; y del 23 de agosto de 2017 a las 18:30 (ambas horas UTC⁶).

4.1 26 de agosto de 2017 (15.40)

Del mismo modo que se ha descrito en la metodología, se parte de datos de estructuras 2D y 3D. En la figura 14 puede verse una imagen en la que se aprecian las diferentes estructuras 2D numeradas y con el número de píxeles que contiene cada una; y en la 15, se ven las células 3D

⁴ En el código (anexo 6), se han establecido unos umbrales que ajusten la resolución. Se deben a que la resolución de los valores de latitud y longitud de productos en rango largo y en rango corto son diferentes; así que es necesario tener cuidado para que la asignación de las velocidades correspondientes a cada píxel también sea unívoca.

⁵ Mi Trabajo Fin de Grado consistía en un algoritmo de este tipo, en el que a partir de la posición angular (ángulo respecto al norte) y la distancia al radar de píxeles con velocidades positivas y negativas clasificada el tipo de estructura mesoescalar. Éstas podían ser ideales (comportamiento ciclónico, anticiclónico, convergente o divergente); o híbridas (no cumplían los requisitos establecidos para las ideales y podían comportarse como convergencias o divergencias con rotación horaria o antihoraria).

⁶ Horas UTC (*Coordinated Universal Time*): UTC se sincroniza con el tiempo medio de Greenwich (obtenido a partir de la duración del día solar). En verano, corresponde con 2 horas menos de las que tenemos en la península.

caracterizadas por su centroide con una densidad de VIL (contenido en agua líquida) determinada.

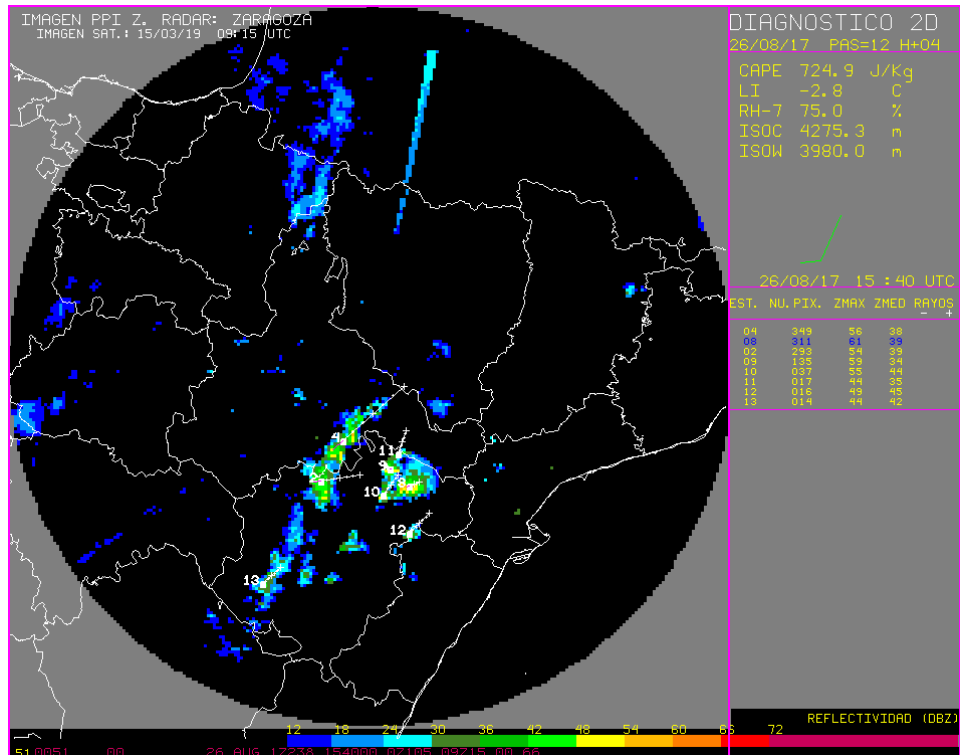


Figura 14: Imagen de reflectividad de estructuras 2D a las 15:40

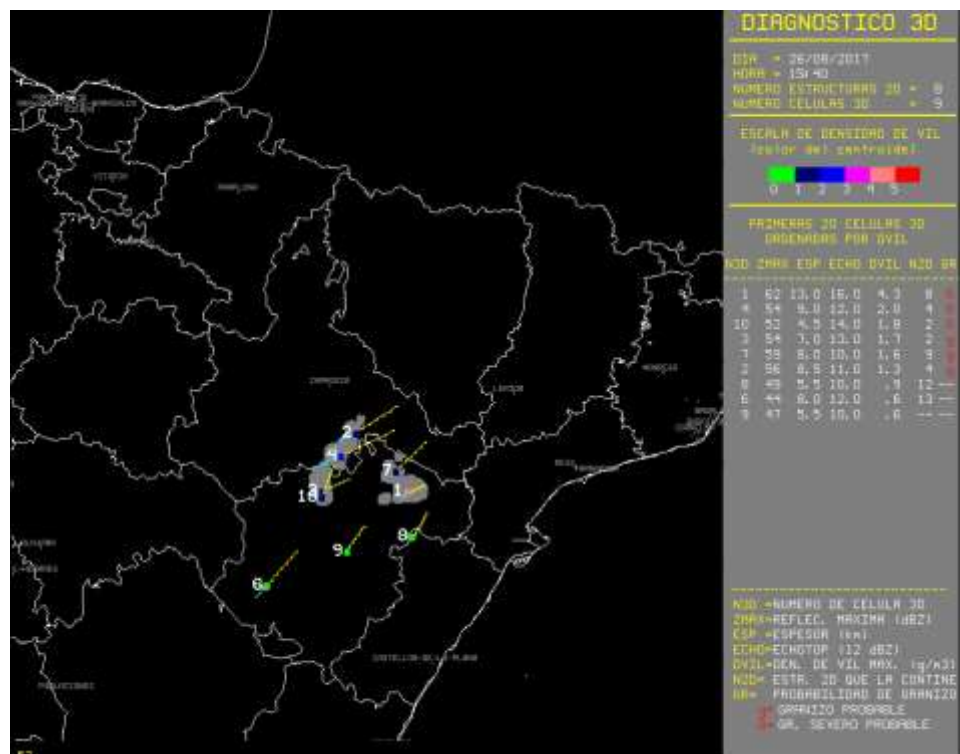


Figura 15: Imagen de células 3D con su "tracking" y extrapolación a las 15:40.

Tras el proceso de asignación de píxeles 2D a células 3D, podemos ver las imágenes de velocidad radial obtenidas por el radar (figura 16). Como es complicado apreciar las variaciones, ya que se

trabaja con estructuras pequeñas en comparación con la cobertura radar; se ha delimitado en rojo la zona donde pueden verse los píxeles con velocidades modificadas (figura 17).

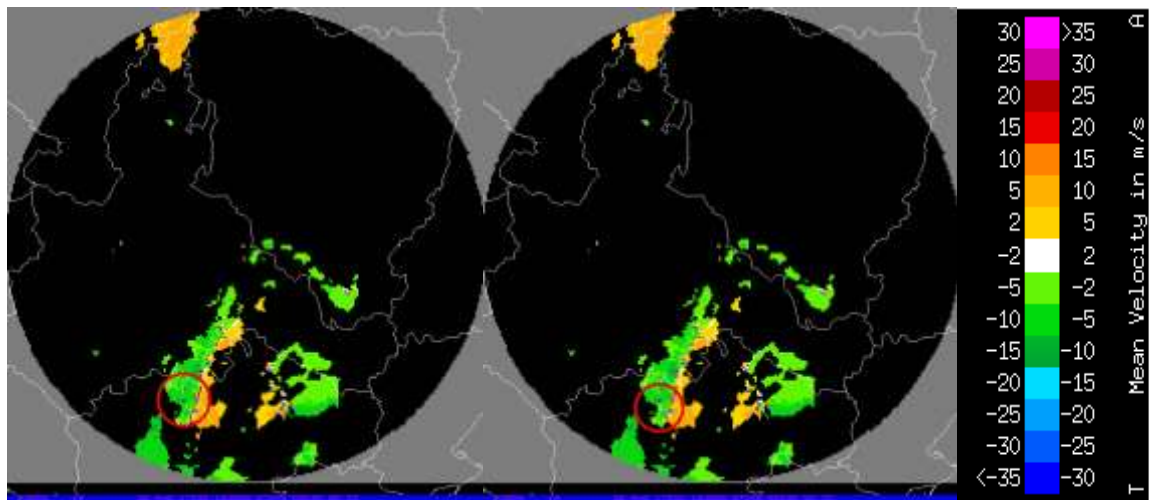


Figura 16: Imágenes radar de velocidad radial. La imagen de la izquierda corresponde con las velocidad sin corregir, y la de la derecha a velocidades corregidas. Colores fríos implica movimiento hacia el radar y cálido alejándose del radar.

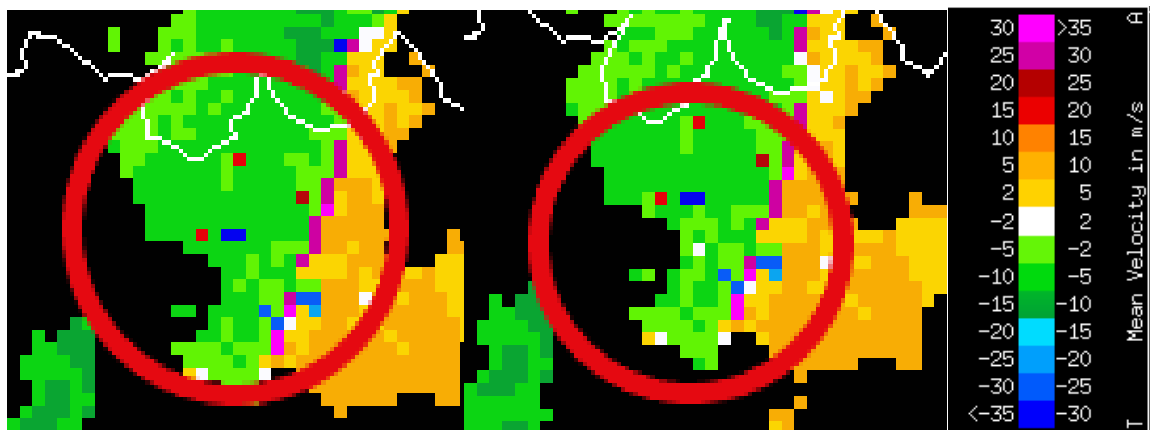


Figura 17: La imagen de la izquierda corresponde con la velocidad de los píxeles sin corregir; y la de la derecha con las velocidades modificadas.

Los colores hacen referencia a los siguientes intervalos de velocidad que pueden apreciarse en la escala, pero como algunas de las modificaciones han sido menores que el rango de valores de cada intervalo no se aprecian en la imagen.

En la figura 18 pueden verse cómo quedan modificadas las velocidades de todos los píxeles en función de su posición angular respecto al norte (para apreciarla mejor, véase anexo 2). En ella se ve que píxeles con posiciones angulares más alejados del norte (en sentido horario) se ven más afectados por las estructuras 3D, ya que al eliminar la componente de velocidad del centroide la variación es mayor. Cabe mencionar que en este caso no aparecen píxeles en los que además de cambiar el módulo de velocidad, también modifican su sentido de circulación, pasando de velocidades positivas a negativas, o a la inversa.

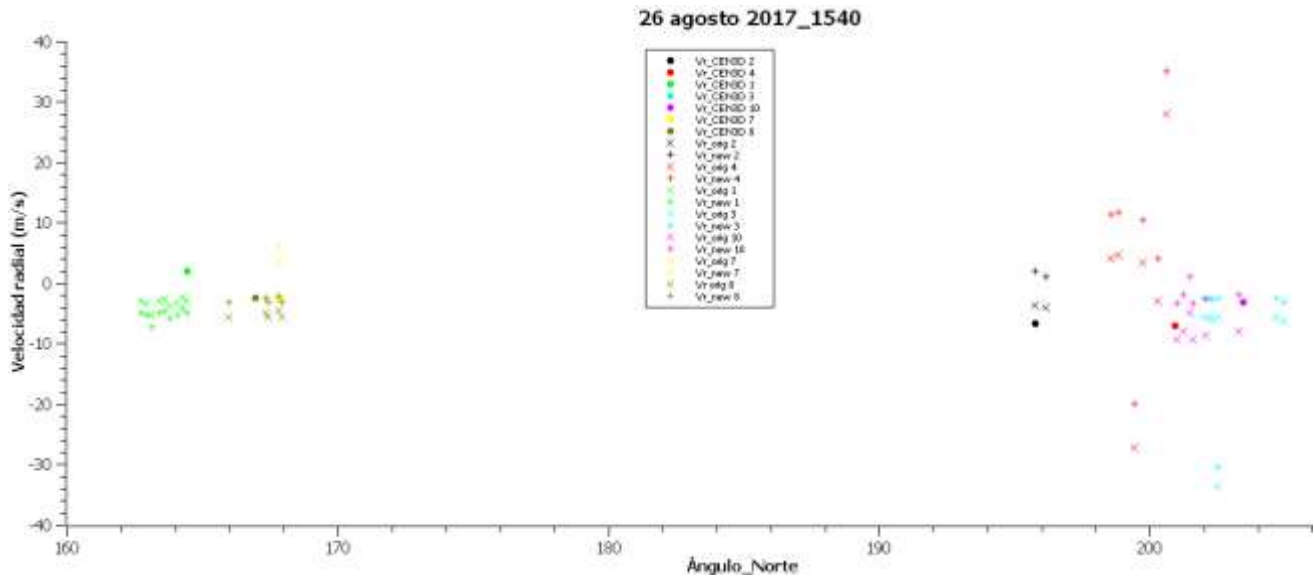


Figura 18: Componente radial de velocidad de los píxeles antes y después de la modificación. Los colores hacen referencia a la célula 3D a la que han sido asignados. Como se ve en la leyenda, las "x" corresponden con las velocidades originales de los píxeles, los "+" a las velocidades modificadas y los "•" a la velocidad del centroide. Los números indican la célula 3D a la que pertenece cada píxel.

A continuación, también se mostrará la identificación de segmentos (figura 19):

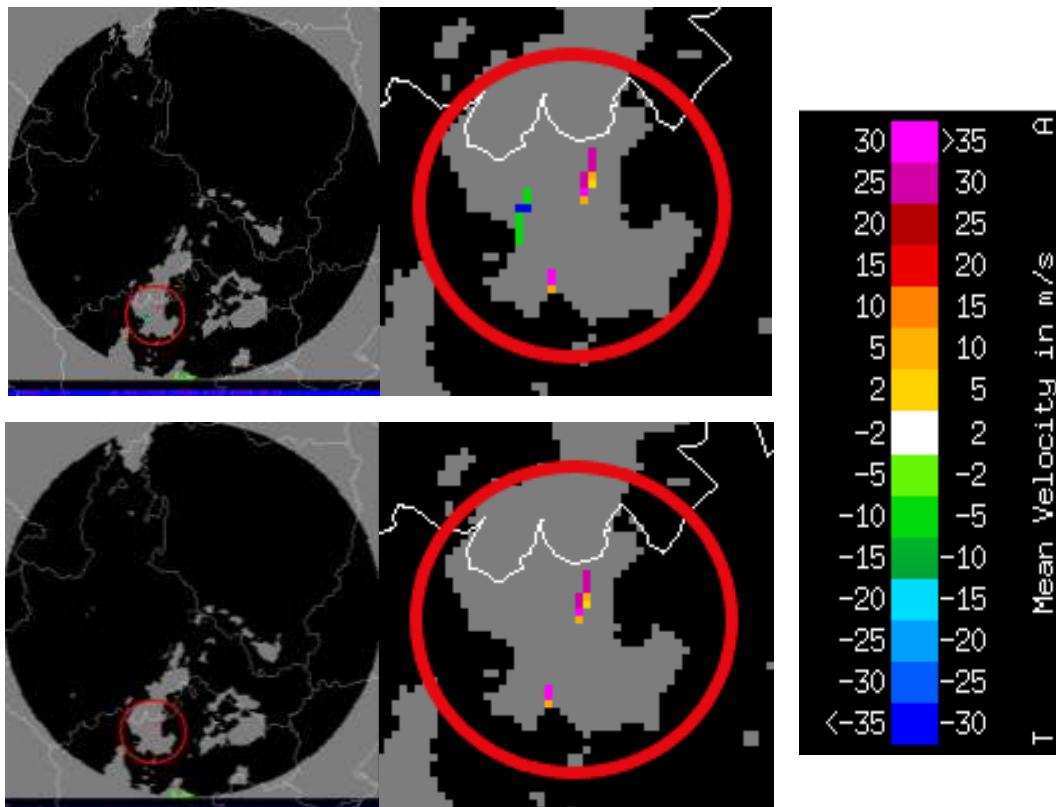


Figura 19: Las imágenes de arriba corresponden a la identificación de segmentos sin aplicar la corrección; y las de abajo hacen referencia a la identificación corregida.

En las imágenes de toda la cobertura radar, puede verse que los segmentos se identifican en la misma zona en la que pueden apreciarse los píxeles con las velocidades modificadas (los grises

son píxeles con velocidad radial pero que no pertenecen a ningún segmento). Puede verse que en la corrección ha desaparecido uno de los segmentos; por lo que al llevar a cabo la nueva detección de estructuras mesoescalares con el algoritmo YMESOCICLONES obtenemos:

SIN CORRECCIÓN				
Ángulo_Mínimo (°)	R_Mínimo (km)	Ángulo_Máximo (°)	R_Máximo (km)	Giro
200.21	84.94	196.10	80.77	Anticiclónico
CON CORRECCIÓN				
Ángulo_Mínimo (°)	R_Mínimo (km)	Ángulo_Máximo (°)	R_Máximo (km)	Giro
-	-	-	-	-

Tabla 1: Tabla de resultados donde se muestra la detección de mesociclones anterior y posterior a la corrección. (26/8/2017 15.40)

En la tabla puede verse que la única estructura detectada antes de aplicar la corrección desaparece, tal y como ha ocurrido con uno de los segmentos.

4.2 23 de agosto de 2017 (18.30)

En este segundo caso, tras haber hecho el estudio pertinente para ver qué píxeles 2D quedan asignados a células 3D podemos ver en la gráfica (figura 20) qué píxeles son los que se modifican y cómo:

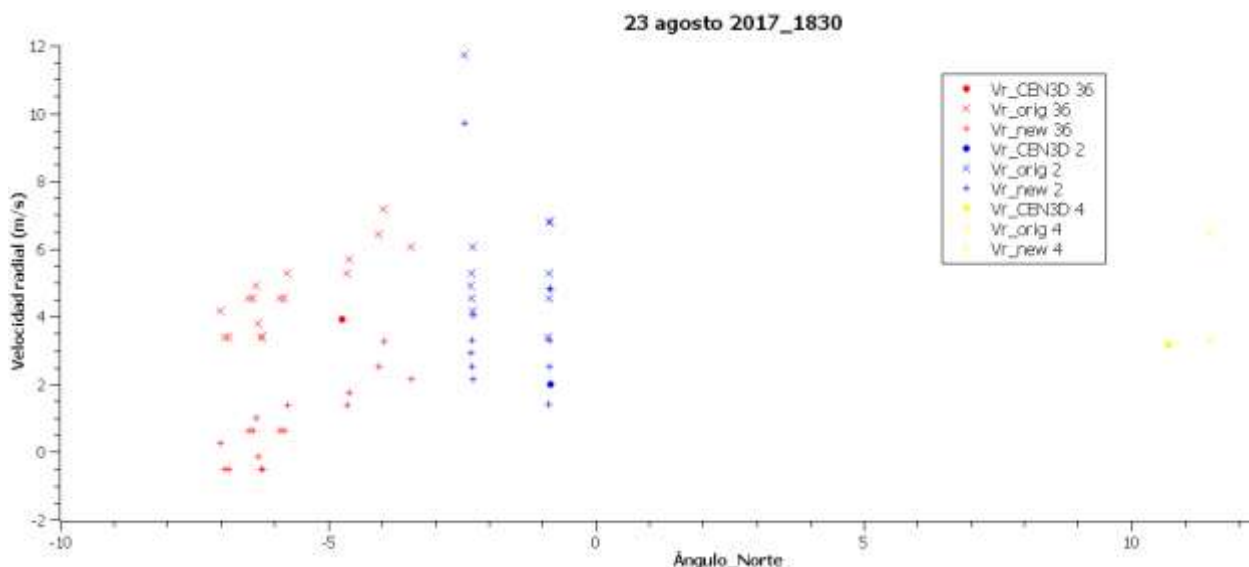


Figura 20: Gráfica modificación de velocidades de los píxeles en función de la posición angular en la que se encuentran. Los colores de los puntos hacen referencia al número de célula 3D a la que han sido asociados. Como se ve en la leyenda, las "x" corresponden con las velocidades originales de los píxeles, los "+" a las velocidades modificadas y los "•" a la velocidad del centroide. Los números indican la célula 3D a la que pertenecen.

En la gráfica podemos apreciar que de nuevo los píxeles que cambian el sentido de circulación son muy pocos; lo que nos lleva a predecir que no tendremos muchas variaciones en la nueva detección de estructuras mesoescalares. (Para apreciarla mejor, véase anexo 3).

A continuación mostraremos las imágenes radar de velocidad radial (figura 21):

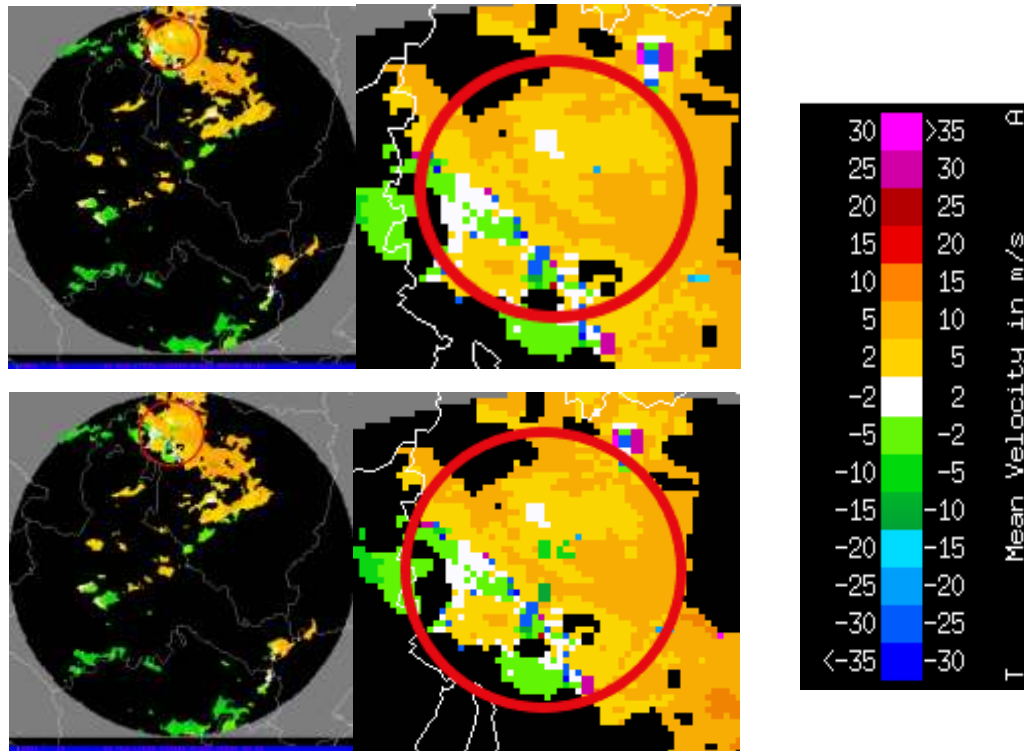


Figura 21: Imagen radar de velocidad radial. A las de arriba no se les ha aplicado corrección; y las de abajo son las que se obtienen tras la modificación de velocidad de los píxeles.

En la imagen del radar podemos ver algunas de las variaciones de velocidad de estos píxeles. En este caso sí que se aprecia el cambio en el sentido de circulación de algunos de los píxeles; pero no es una variación muy sustancial; ya que como veremos en las imágenes de segmentos (figura 22) la identificación de éstos antes y después de aplicar la corrección es la misma.

De nuevo, aquellos que sí se ven modificados y no es posible ver, es debido a que no tienen la variación suficiente para cambiar de intervalo en la escala de colores que se ha establecido; que es la misma que en el caso anterior.

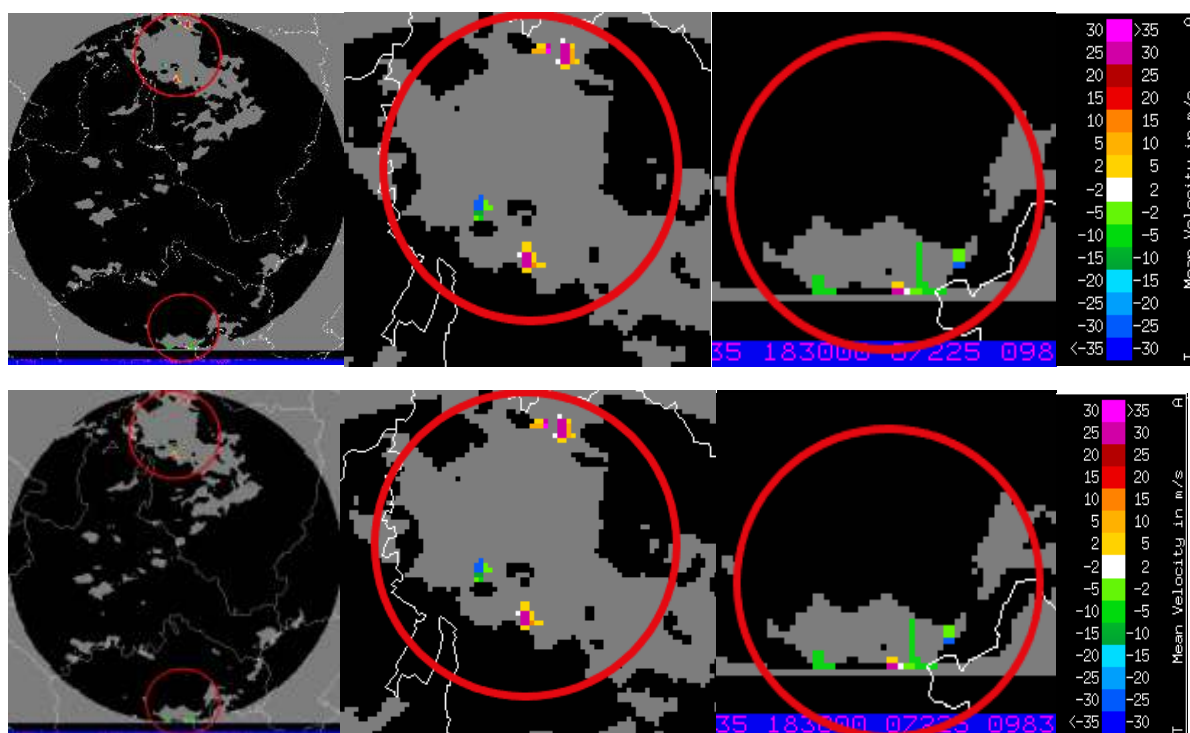


Figura 22: Imagen radar de segmentos. Las imágenes de arriba corresponden con los segmentos iniciales, y las de debajo a los segmentos obtenidos tras haber modificado la velocidad de determinados píxeles.

En este caso, en los segmentos no se aprecia ninguna variación. Al aplicar la corrección puede verse que se detectan los mismos; por lo que al identificar las estructuras mesoescalares, comprobamos que tampoco se produce ningún cambio (tabla 2):

SIN CORRECCIÓN				
Ángulo_Mínimo (°)	R_Mínimo (km)	Ángulo_Máximo (°)	R_Máximo (km)	Giro
170,89	117,00	175,86	119,88	-
CON CORRECCIÓN				
Ángulo_Mínimo (°)	R_Mínimo (km)	Ángulo_Máximo (°)	R_Máximo (km)	Giro
170,89	117,00	175,86	119,88	-

Tabla 2: Tabla de resultados donde se muestra la detección de mesociclones anterior y posterior a la corrección. (23/8/2017 18.30)

Comparando los resultados obtenidos en la detección de estructuras mesoescalares de ambos días, puede verse que no hay ninguna tendencia ni dependencia clara de lo que supone eliminar la componente de velocidad global para obtener la velocidad final del píxel. Es decir, que al restar esta velocidad global de la célula, en un caso se elimina la estructura detectada; y en otro

realiza la misma identificación. También existen casos (anexo 4) en los que no se identificaban antes de la corrección y tampoco después⁷.

5. CONCLUSIONES

- En este trabajo se ha abordado una modelización de las estructuras mesoescalares cambiando su descripción desde el punto de vista del radar a su visión desde el centroide de la célula.
- La finalidad inicialmente prevista y perseguida por AEMET de que tal modelización mejoraría la detección y predicción de las mismas, no se ha visto plenamente satisfecha. A partir de los resultados expuestos en el apartado 4 puede apreciarse que no se produce una mejora sustancial en la identificación de estructuras; ya que las variaciones no son muy significativas. El número de píxeles que modifican su velocidad radial no es elevado; y aquellos que sí cambian de velocidad, como hemos dicho anteriormente, solamente modifican el módulo (hay muy pocos que cambien el sentido de circulación); por lo que en la detección de estructuras mesoescalares puede identificarse lo mismo que sin aplicar la corrección (resultado del 23/08) o incluso llegar a eliminar la estructura detectada sin aplicar la corrección (resultado del 26/08).
- Aunque todavía no se ha dado con la clave para solucionar este problema, creemos que los resultados podrían mejorarse introduciendo alguna variación complementaria. Se han estudiado las horas de mayor convectividad de dos días concretos en los que se tenía la constancia de esta actividad; no obstante, puede ser necesario estudiar días en los que el umbral de actividad convectiva sea mayor. Esto implicaría que la velocidad de corrientes ascendentes y descendentes del interior de las células convectivas aumentara y la componente radial de la velocidad de los píxeles podría variar más al restar la velocidad a la que se desplaza la célula 3D. Una variación mayor en los módulos de velocidad radial podría llevar asociados cambios en el sentido de circulación de un mayor número de píxeles y con ello una mejor identificación de las estructuras. Otra opción sería, incorporar correcciones (como puede ser el cambio de los umbrales en los criterios de cercanía de máximos y mínimos de velocidad radial) dentro de la propia aplicación YMESOCICLONES, de forma que ambos métodos se complementen.
- Una mayor resolución espacial en el radar permitiría realizar determinaciones de las estructuras mucho más precisas y probablemente mejoraría la caracterización. No incidimos más en este aspecto por estar fuera de nuestro alcance. Además, únicamente tenemos datos del PPI más bajo, por lo que si se forman estructuras por encima o por debajo no es posible detectarlas.
- La realización de este trabajo, junto con el trabajo Fin de Grado, ha complementado una labor formativa dado que me ha permitido familiarizarme y adquirir conocimientos en el ámbito de la Meteorología no abordados en el plan de estudios, ni del Grado ni del Máster.

⁷ En el anexo 5 se muestra otro resultado en el que aparece una estructura detectada, pero tras aplicar la corrección se modifican los segmentos detectados, pero dejan de dar lugar a la formación de otra estructura.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RINEHART, R. E., 2004: *Radar for Meteorologists*. 4th, Rinehart Publications, Columbia, MO, 482 pp.
- [2] J. S. MARSHALL and W. MCK PALMER, 1948: *The distribution of raindrops with size*. Journal of Meteorology, 5, 165
- [3] OLMO, M. and NAVE, R, (2019): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/reldop2.html>
- [4] MARTÍNEZ ARNÁIZ, R. 2010: *Formación en técnicas de predicción de fenómenos convectivos mediante radar meteorológico*. Memoria Proyecto nº 8.
- [5] MARTÍN, F. and O. CARRETERO, 2001a: *Análisis de estructuras y células convectivas mediante datos de radar regional: aplicación YRADAR*. STAP-INM
- [6] HOUZE Jr. R. A., 1997: *Stratiform Precipitation in Regions of Convection: A Meteorological Paradox*. Bulletin of the American Meteorological Society: Vol. 78, No. 10, pp. 2179-2196.
- [7] MARTÍN, F. 2001a: *Identificación objetiva de estructuras convectivas a partir de los datos radar PPI/CAPPI bajo en McIDAS*. V Simposio Nacional de Predicción (INM)
- [8] CARRETERO, O. 2001: *Procedimiento de identificación, seguimiento y extrapolación de células en 3 dimensiones*. V Simposio Nacional de Predicción (INM)
- [9] J. T JOHNSON et al 1998: *The Storm Cell Identification and Tracking (SCIT) Algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm*, Wea. Forecasting, 13, 263-276
- [10] QUIRANTES J.A. (2012): Taller de Convección para predictores del CNP. *Introducción a las supercélulas*.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mis tutores, Ismael, por aceptar de nuevo la labor de dirigir el trabajo y dedicar parte de su tiempo a la ayuda y explicación de conceptos relativos a este trabajo; y Juan Pablo, por la ayuda dedicada estos meses. Además, agradecer a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) por permitirme la posibilidad de formarme y trabajar con ellos. También a mi compañero Francisco Bauzá por la aportación de diferentes puntos de vista en el enfoque del trabajo.